ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-749-762
УДК 664.843.54

Оригинальная статья
http://fptt.ru

О коррекции углеводного состава сырья для микробной трансформации консорциумами микроорганизмов

В. В. Кондратенко, Н. Е. Посокина*, О. Ю. Лялина, А. Ю. Колоколова, С. В. Глазков

Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования, Видное, Россия

**e-mail: Labtech45@yandex.ru*

Дата поступления в редакцию: 02.11.2020
Дата принятия в печать: 25.12.2020

© В. В. Кондратенко, Н. Е. Посокина, О. Ю. Лялина, А. Ю. Колоколова, С. В. Глазков, 2020

Аннотация.
Введение. Использование консорциумов чистых культур молочнокислых микроорганизмов может стать хорошей альтернативой дикого (спонтанного) ферментирования капусты за счёт создания условий для синергетического взаимодействия видов микроорганизмов друг с другом. В этом случае процесс ферментирования становится управляемым путём корректирования углеводного состава субстрата. Цель исследования – разработка аналитического подхода к определению минимально необходимой степени изменения нативного углеводного состава субстрата для обеспечения синергизма молочнокислых микроорганизмов рода *Lactobacillus* видов *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus plantarum* и *Lactobacillus brevis* в парных консорциумах в процессе направленного ферментирования белокочанной капусты сорта «Слава».
Объекты и методы исследования. Процесс ферментирования проводили с использованием штаммов молочнокислых микроорганизмов *L. casei ВКМ 536*, *L. plantarum ВКМ В-578*, *L. brevis ВКМ В-1309* и их парных консорциумов. Исходное растительное сырьё подвергали измельчению и удалению эпифитной микрофлоры для создания оптимальных условий для развития целевой молочнокислой микрофлоры.
Результаты и их обсуждение. Изучена динамика сбраживания углеводной составляющей белокочанной капусты штаммами молочнокислых микроорганизмов и их парными консорциумами в процессе направленного ферментирования. Разработаны математические модели, адекватно описывающие динамику сбраживания глюкозы и фруктозы в процессе ферментирования. Определены динамики типа взаимодействия молочнокислых микроорганизмов в парных консорциумах. Разработан подход к определению минимально необходимой степени изменения нативного углеводного состава субстрата для обеспечения синергизма молочнокислых микроорганизмов в парных консорциумах.
Выводы. Для всех трёх парных консорциумов молочнокислых микроорганизмов определено необходимое количество дополнительно вносимой углеводной составляющей. Установлено, что для квашения белокочанной капусты сорта «Слава» целесообразно использовать консорциум *L. brevis* + *L. plantarum* с добавлением к субстрату фруктозы в количестве не менее 3,65 г/100 г. Разработанный подход может быть использован при совершенствовании существующих и создании новых промышленных технологий производства ферментированной продукции из растительного сырья.

Ключевые слова. Ферментация, белокочанная капуста, молочнокислые микроорганизмы, консорциумы, модельная среда, сбраживание углеводов

Финансирование. Работа выполнена на базе Всероссийского научно-исследовательского института технологии консервирования (ВНИИТеК) в рамках НИР 0585-2019-000913-С03 «Развить биотехнологические основы трансформации растительной ткани и её биополимерных комплексов для разработки технологий управляемого ферментирования и производства некрахмальных гидроколлоидов».

Для цитирования: О коррекции углеводного состава сырья для микробной трансформации консорциумами микроорганизмов / В. В. Кондратенко, Н. Е. Посокина, О. Ю. Лялина [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2020. – Т. 50, № 4. – С. 749–762. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-749-762.

Original article

Available online at http://fptt.ru/eng

Correction of the Carbohydrate Composition of Raw Materials for Microbial Transformation Based on Microbial Consortia

Vladimir V. Kondratenko, Natalia E. Posokina*, Ol'ga Yu. Lyalina, Anastasiay Yu. Kolokolova, Sergey V. Glazkov

Russian Research Institute of Canning Technology,
Vidnoye, Russia

Received: November 02, 2020
Accepted: December 25, 2020

*e-mail: Labtech45@yandex.ru

© V.V. Kondratenko, N.E. Posokina, O.Yu. Lyalina, A.Yu. Kolokolova, S.V. Glazkov, 2020

Abstract.
Introduction. Fermentative processing of plant raw materials is traditionally carried out using native (epiphytic) microflora, which is located on the surface and represented by lactic acid microorganisms. During this process, the carbohydrates in the raw material are metabolized into lactic acid. This process does not always result in optimal product quality as the raw material often lacks carbohydrates, the optimal conditions for the development of the target microflora are hard to achieve, the microflora might be inhibited by contaminants, etc. Lactic acid microbial consortia can act as a good alternative to spontaneous fermentation of cabbage as this method creates good conditions for the microbial synergistic interaction. Such fermentation process can be controlled by adjusting the carbohydrate composition of the substrate. The research objective was to develop an analytical approach to determine the minimum required degree of change in the native carbohydrate composition of substrate that would ensure the synergy of lactic acid microorganisms.
Study objects and methods. The fermentation process was performed using white cabbage of Slava variety and such strains of lactic acid microorganisms as *Lactobacillus casei VCM 536*, *Lactobacillus plantarum VCM B-578*, and *Lactobacillus brevis VCM B-1309*, as well as their paired consortia. The raw material was subjected to grinding, and the epiphytic microflora was removed to create optimal conditions for the development of the lactic acid microflora.
Results and discussion. The study made it possible to define the dynamics of carbohydrate fermentation in white cabbage by various strains of lactic bacteria and their paired consortia during processing. Mathematical models helped to describe the dynamics of glucose and fructose fermentation. The experiment also demonstrated the changes that occurred in the interaction within the paired consortia during fermentation. The paper introduces a new approach to determining the minimum required degree of change in the native carbohydrate composition required to ensure synergy of lactic acid microorganisms in paired consortia.
Conclusion. The research defined the necessary amounts of carbohydrate needed to shift the integral factor of mutual influence towards sustainable synergy for three paired consortia. Consortium *L. brevis* + *L. plantarum* + 3.65 g/100 g of fructose proved to be the optimal variant for industrial production of sauerkraut from white cabbage of Slava variety. The developed approach can improve the existing industrial technologies of fermentation and create new ones.

Keywords. Fermentation, white cabbage, lactic acid microorganisms, consortia, model medium, carbohydrate digestion

Funding. The work was performed on the premises of the Russian Research Institute of Canning Technology (VNIITeK) as part of research project No. 0585-2019-000913-C03 “Improving the biotechnological bases for plant tissue and its biopolymer complexes transformation in order to develop new technologies for controlled fermentation and production of non-starch hydrocolloids”.

For citation: Kondratenko VV, Posokina NE, Lyalina OYu, Kolokolova AYu, Glazkov SV. Correction of the Carbohydrate Composition of Raw Materials for Microbial Transformation Based on Microbial Consortia. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(4):749–762. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-749-762.

Введение

Капуста – один из самых распространённых культивируемых видов овощных растений. Площадь посадок данной культуры в России занимает около 30 % от всего объема площадей, занятых овощными культурами. При этом капуста традиционно является одним из главных овощей в структуре питания населения в России: на капустные культуры приходится практически 30 % всего потребления. Несомненным преимуществом данного вида овощей является тот факт, что его использование возможно как в свежем, так и в переработанном виде. Например, после замораживания или прохождения процесса ферментирования (квашения) [1–3].

В России распространение данной овощной культуры объясняется разнообразным химическим составом, обуславливающим её технологические, вкусовые, диетические и лечебные качества, возможностью выращивания в различных природно-климатических зонах. В состав белокочанной капусты входят 2,5 % белка до 6–7 % сахаров, около 1,2 % минеральных веществ, незаменимые аминокислоты, такие как триптофан, метилметионин, лизин и тирозин. Содержание витамина С может достигать до 62 мг в 100 г свежего сырья [4]. Углеводы белокочанной капусты представлены глюкозой и фруктозой. В минеральном составе преобладает калий, благоприятно влияющий на водный и жировой обмен в организме.

Для ферментирования (квашения) используют белокочанную капусту поздних и среднепоздних сортов, содержащих максимальное количество сахаров (не менее 40 г/кг сырья). Основными признаками пригодности свежей белокочанной капусты для квашения являются: химический состав, плотность и масса кочанов, отсутствие интенсивного зеленого окрашивания у листьев и глубина вхождения кочерыги [3–6]. От качества исходного

сырья зависит качество готовой продукции. Одним из основных качественных показателей сырья является содержание сахаров, поскольку наличие достаточного количества нутриентов делает возможным комфортное «размножение» молочнокислых микроорганизмов. При этом в продукте происходит накопление органических кислот, которые в определённом количестве не только препятствует развитию микроорганизмов порчи, но и вносят свою лепту в формирование органолептических показателей конечного продукта [3].

На поверхности капусты присутствует нативная (эпифитная) микрофлора, представленная молочнокислыми микроорганизмами. Под их воздействием содержащиеся в сырье простые углеводы метаболизируются в молочную кислоту [7–9]. Так традиционно производят ферментированную (квашеную) капусту. Однако данный процесс не всегда приводит к получению продукта желаемого качества. Причиной этого может быть недостаток углеводов в сырье, отсутствие оптимальных условий для развития целевой микрофлоры, а также присутствие ряда ингибирующих микрофлору контаминантов и др. Поэтому использование консорциумов чистых культур молочнокислых микроорганизмов может выступать в качестве альтернативы дикого (спонтанного) ферментирования за счёт создания условий для синергетического взаимодействия микроорганизмов друг с другом [10]. В этом случае процесс ферментирования становится управляемым путём корректирования углеводного состава субстрата.

Применение различных штаммов молочнокислых микроорганизмов позволяет достичь быстрого накопления молочной кислоты, снижения pH. Это ведет к ингибированию роста, развитию патогенной микрофлоры и к созданию оптимальных условий для протекания процесса [11–13].

Для комфортного размножения молочнокислых бактерий необходимо наличие в исходном сырье белков, небелковых азотистых соединений и минеральных солей: калиевых, кальциевых, магниевых, фосфорных и пр. Углеводы овощей используются молочнокислыми микроорганизмами в качестве источника энергии. Многие виды молочнокислых бактерий успешно развиваются в самых разных температурных условиях. Вплоть до 1–2 °C выше нуля [14, 15].

Применение чистых культур молочнокислых бактерий (или стартерных активаторов) и их консорциумов позволяет интенсифицировать процессы ферментирования при условии соблюдения оптимальных условий проведения процесса. Направленное использование биохимической активности микроорганизмов приводит к максимальному накоплению обладающей консервирующим действием молочной кислоты за короткий временной промежуток. Это исключает возможность развития микроорганизмов порчи, а также позволяет минимизировать производственные потери, получая хороший вкус, аромат и текстуру, уменьшая время созревания ферментированной продукции [16–18].

Зная какие виды микроорганизмов участвуют в процессе, закономерности их развития, динамику взаимного влияния, а также влияние состава культуральной среды (главным образом её углеводной составляющей), можно управлять данным процессом, т. е. создавать технологии управляемого ферментирования растительного сырья. В итоге можно получить продукты с заданными свойствами с минимизацией потерь.

Целью исследования стала разработка аналитического подхода к определению минимально необходимой степени изменения нативного углеводного состава субстрата для обеспечения синергизма молочнокислых микроорганизмов рода *Lactobacillus* видов *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus plantarum* и *Lactobacillus brevis* в парных консорциумах в процессе направленного ферментирования белокочанной капусты сорта «Слава».

Объекты и методы исследования

Изготовление модельных сред. Модельная среда изготовлена на базе белокочанной капусты среднепозднего срока созревания сорта «Слава», выращенной на опытном поле ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства» (Московская область, Одинцовский район, п. ВНИИССОК). Кочаны отбирали по размерам, соответствующим среднесортовым, а именно диаметр – около 20 см, вес – 3 кг, текстура (консистенция) – плотная, трещиностойкая. Модельную среду готовили следующим образом: с кочанов удаляли сухие, вялые, повреждённые покровные листья, затем кочаны тщательно промывали под проточной водой, далее закладывали в устройство для разделения кочана и удаления кочерыги «HGW» («Kronen GmbH»). Подготовленные сегменты отправляли в машину для шинкования капусты «SN 100» («Kronen GmbH»), где шинковали полосками толщиной 3–5 мм. Подготовленную капусту бланшировали в варочном котле с паровой рубашкой при непрерывном перемешивании в течение 3 мин при температуре 98–100 °C. Бланшированную капусту откидывали на сита из нержавеющей стали, охлаждали проточной водой в течение 1–2 мин. Затем капусту гомогенизировали на измельчителе растительного сырья «Robot coupe» R-6 (Франция). Для подготовки средней пробы измельчённую массу переносили в емкости из нержавеющей стали объёмом 20 л, вносили сухой NaCl (промышленного производства) в количестве 1,5 % (от массы капусты)

и тщательно перемешивали до полного растворения соли. Затем подготовленную массу расфасовывали в предварительно стерилизованные банки объёмом 100 мл, укупоривали крышками «Твист-Офф» и отправляли на стерилизацию с целью устранения посторонней микрофлоры. Стерилизацию проводили при 100 °С в лабораторном вертикальном автоклаве (ООО ПКФ «Промсервис», г. Пенза) в течение 20 мин при противодавлении 1 бар. После охлаждения подготовленные образцы хранили в темном месте (без доступа солнечного света) при температуре 20–23 °С и влажности воздуха не выше 75 %.

Подготовка к микробиологическим анализам. В качестве стартовых культур использовали микроорганизмы рода *Lactobacillus* видов *Lactobacillus plantarum MT* (получен из штамма ВКМ В-578), *Lactobacillus brevis M8* (получен из штамма ВКМ В-1309), *Lactobacillus casei 536/17* (получен из штамма ВКМ В 536) и их парные консорциумы. Исходные штаммы получены из официальной коллекции микроорганизмов ФГУП ГосНИИгенетика и идентифицированы в соответствии с Bergey's manual of determinative bacteriology[1]. Процедура ведения культуры включала несколько этапов: восстановление лиофилизированной культуры, создание и хранение запасов рабочей культуры, восполнение запасов рабочей культуры, подготовка культуры для целевого использования, контроль видовых и паспортных свойств.

Приготовление питательных сред. Питательные среды (culture medium), использованные в исследованиях, представляли собой жидкие (liquid medium) и агаризованные питательные среды (solid medium) MRS, предоставленные фирмой HiMedia. Готовые питательные среды представляли собой мелкодисперсный порошок желтого цвета.

Получение MRS агара. Навеску готовой питательной среды *Lactobacillus* MRS Agar M641 взвешивали на весах фирмы «GH620S» (Германия) в количестве 67,15 г с точностью ± 0,01 г. Затем ее растворяли в 1000 см^3 дистиллированной воды, подготовленной на дистилляторе WD-1008 (Корея), при постоянном перемешивании и кипячении на водяной бане «UT-4305» в течение 3 мин до полного растворения частиц. Полученные среды фильтровали через ватно-марлевый фильтр, разливали с применением серологической пипетки по 300 см^3 в колбы и стерилизовали в автоклаве «MLS-3781L» (Япония) при 1,1 атм (121 °С) в течение 15 мин. Готовая среда представляла собой прозрачный раствор коричневого цвета. pH готовой питательной среды составляла 6,5 (определяли на pH-метре «Иномер Итан» (Россия)).

Скошенный агар MRS готовили также. Однако раствор разливали не в колбы, а в пробирки по 5 см^3; после стерилизации полученные пробирки наклоняли под углом 30° до полного застывания.

Для получения бульона MRS навеску готовой среды *Lactobacillus* MRS Broth M369 в количестве 67,15 г растворяли в 1000 см^3 дистиллированной воды, дальнейшие действия проводили аналогично приготовлению среды MRS агар.

Процедура ведения культуры. Восстановление лиофилизированной культуры микроорганизмов (referece strain) и получение контрольного (эталонного) исходного штамма (referece stock). Оттянутый конец ампулы с лиофилизированной культурой нагревали над пламенем горелки. Влажным концом стерильного ватного тампона прикасались к нагретой части, в результате чего появлялись трещины. Конец ампулы накрывали хорошо отжатой трехслойной марлевой салфеткой, смоченной 70 %-ным этиловым спиртом, и обламывали пинцетом.

Вскрытую с помощью салфетки ампулу оставляли накрытой той же салфеткой в течение 1–2 мин. Затем ее аккуратно удаляли и вместе с остатками стекла погружали в 70 % раствор этилового спирта. С целью регидратации в ампулу вносили 0,5 мл питательного бульона. Затем содержимое ампулы перемешивали, переносили стерильным шприцем в пробирку с питательным бульоном и инкубировали в термостате «ТСО-1/20-СПУ» (Россия). Дальнейшее термостатирование и инкубацию проводили в данном термостате при 30 ± 1 °С в течение 72–120 ч. После инкубации полученную суспензию микроорганизмов высевали петлёй на скошенный агар MRS. Посевы инкубировали при температуре 30 °С в течение 72–120 ч.

Создание запасов рабочей культуры (working culture). Полученную рабочую культуру использовали для подготовки стартеров культур. Одну из пробирок с культурой, предназначенной для восполнения рабочих запасов, маркировали и хранили отдельно.

Восполнение запасов рабочей культуры и подготовку стартовой культуры производили аналогично методу получения рабочей культуры. Восполнение запасов рабочей культуры проводили в конце третьего, шестого и девятого месяца с момента вскрытия ампулы.

Инокуляция. Модельные системы представляли собой среды, инокулированные монокультурами или консорциумами изучаемых микроорганизмов. Получение модельной системы проводили следующим образом: одну из подготовленных стартовых культур (в случае консорциумов – сочетание двух стартовых культур в равных долях) вносили в заранее приготовленную модельную среду из расчёта 1 % инокулята от массы модельной среды.

Культивирование. В течение первых трех суток проводили активную фазу ферментирования в термостате при температуре +23–25 °С, затем

[1] Bergey, D. H. Bergey's manual of determinative bacteriology. Ninth edition / D. H. Bergey, J. G. Holt. – Baltimore : Williams and Wilkins, 1994. – 787 p.

образцы выдерживали весь период исследований (в течение 90 суток) при температуре от –1 до +4 °С.

Определения количества молочнокислых микроорганизмов. Определение скорости культивирования микроорганизмов проводили путем выборочного контроля количества микроорганизмов на 0, 1, 3, 10, 30, 60, 90 сутки культивирования. Отбор и микробиологический анализ образцов проводили в трёх повторностях по следующей схеме. Для каждого образца готовили 7 последовательных десятикратных разведений. Каждое из полученных разведений объёмом по 1 см^3 высевали в две параллельные чашки Петри диаметром 90 мм и заливали заранее подготовленным агаром MRS, температура агара не превышала 45 °С. Посевы равномерно распределяли по поверхности чашки Петри и оставляли до полного застывания агара. Посевы инкубировали при температуре 30 °С в течение 72–120 ч.

Химические анализы. Исследование динамики изменения содержания сахаров проводили методом ВЭЖХ на жидкостном хроматографе с рефрактометрическим детектором Perkin Elmer Series 200, колонка – Agilent Zorbax Carbohydrate 4,6×250 мм, подвижная фаза – «ацетонитрил:вода» 75:25, скорость потока 1 см^3/мин в изократическом режиме. Идентификацию глюкозы и фруктозы проводили по абсолютному времени удерживания в образцах через сравнение со временем удерживания в градуировочных растворах. Расчёт концентрации проводили методом внешнего стандарта.

Статистический анализ. Математическая обработка данных включала отсев статистических выбросов, нахождения функциональных зависимостей, адекватно описывающих поведение системы в процессе ферментирования. Сравнительный анализ зависимостей проводили в Microsoft Excel и SYSTAT TableCurve 2D. Все эксперименты проводили в трёх повторностях.

Результаты и их обсуждение

Анализ результатов экспериментальных данных показывает, что в процессе ферментирования модельной среды имеет место некоторое монотонное нелинейное уменьшение массовых долей глюкозы и фруктозы во всех исследованных вариантах: при культивировании как монокультур, так и их парных консорциумов (табл. 1).

В отдельные периоды времени были отмечены единичные флуктуации значений исследуемых показателей относительно общей динамики. Однако, принимая во внимание величины погрешности эксперимента и неинтерпретируемость таких отклонений, есть основание считать их статистическими выбросами.

Для адекватного оперирования экспериментальными данными было получено математическое описание – модели – анализируемых динамик, представленное для всех вариантов с монокультурами функцией вида:

$$y_{js} = a_{js} \cdot \left(1 - \exp\left(-b_{js} \cdot x\right)\right) \quad (1)$$

где x – продолжительность ферментирования, сутки; a_{js} и b_{js} – расчётные коэффициенты для j-ой культуры.

Аналогично математическое описание (модели) динамики экспериментальных данных для вариантов с консорциумами представлено функцией вида:

$$y_{cs} = a_{cs} \cdot \left(1 - \exp\left(-b_{cs} \cdot x\right)\right) \quad (2)$$

где a_{cs} и b_{cs} – расчётные коэффициенты для консорциума.

Показатели и статистические характеристики моделей динамики массовых долей глюкозы и фруктозы в процессе ферментирования для всех исследованных вариантов представлены в таблице 2.

Преимущества использования консорциумов микроорганизмов вместо монокультур в процессе микробной трансформации целевого субстрата могут быть определены исключительно по наличию, выраженности и стабильности в течение всего периода обработки синергизма между видами

Таблица 1. Динамика массовых долей глюкозы и фруктозы в процессе ферментирования (г/100 г)

Table 1. Dynamics of mass fractions of glucose and fructose during fermentation (g/100 g)

Монокультура или консорциум		Продолжительность ферментирования, сутки							
		0	1	2	3	10	30	60	90
L. casei	глюкоза	2,26 ± 1,02	1,97 ± 0,38	1,45 ± 0,64	1,60 ± 1,14	1,87 ± 0,64	0,99 ± 0,64	1,80 ± 1,4	1,22 ± 0,89
	фруктоза	2,04 ± 1,02	1,43 ± 0,38	1,12 ± 0,64	0,64 ± 1,14	0,89 ± 0,64	0,34 ± 0,64	1,26 ± 1,4	0,45 ± 0,89
L. brevis	глюкоза	2,26 ± 1,02	2,03 ± 0,38	1,51 ± 0,64	1,82 ± 1,14	2,03 ± 0,64	1,41 ± 0,64	1,65 ± 1,4	1,10 ± 0,89
	фруктоза	2,04 ± 1,02	1,41 ± 0,38	1,08 ± 0,64	0,93 ± 1,14	1,10 ± 0,64	0,44 ± 0,64	1,09 ± 1,4	0,46 ± 0,89
L. plantarum	глюкоза	2,26 ± 1,02	1,96 ± 0,38	1,93 ± 0,64	1,79 ± 1,14	1,74 ± 0,64	1,26 ± 0,64	1,79 ± 1,4	0,97 ± 0,89
	фруктоза	2,04 ± 1,02	1,38 ± 0,38	1,39 ± 0,64	0,95 ± 1,14	0,99 ± 0,64	0,38 ± 0,64	1,15 ± 1,4	0,39 ± 0,89
L. brevis + *L. casei*	глюкоза	2,26 ± 1,02	1,85 ± 0,38	1,68 ± 0,64	1,57 ± 1,14	2,03 ± 0,64	1,40 ± 0,64	1,71 ± 1,4	1,57 ± 0,89
	фруктоза	2,04 ± 1,02	1,43 ± 0,38	1,24 ± 0,64	1,10 ± 1,14	1,35 ± 0,64	0,46 ± 0,64	0,87 ± 1,4	0,36 ± 0,89
L. brevis + *L. plantarum*	глюкоза	2,26 ± 1,02	1,90 ± 0,38	1,76 ± 0,64	1,65 ± 1,14	1,88 ± 0,64	1,37 ± 0,64	1,75 ± 1,4	2,77 ± 0,89
	фруктоза	2,04 ± 1,02	1,41 ± 0,38	1,32 ± 0,64	0,97 ± 1,14	1,15 ± 0,64	0,42 ± 0,64	0,93 ± 1,4	0,33 ± 0,89
L. casei + *L. plantarum*	глюкоза	2,26 ± 1,02	2,03 ± 0,38	1,67 ± 0,64	2,04 ± 1,14	1,91 ± 0,64	1,24 ± 0,64	1,56 ± 1,4	3,02 ± 0,89
	фруктоза	2,04 ± 1,02	1,45 ± 0,38	1,28 ± 0,64	1,07 ± 0,64	1,16 ± 0,64	0,39 ± 0,64	1,25 ± 1,4	0,35 ± 0,89

Таблица 2. Показатели и статистические характеристики моделей динамики массовых долей глюкозы и фруктозы в процессе ферментирования

Table 2. Indicators and statistical characteristics of dynamic models of mass fractions of glucose and fructose during fermentation

Монокультура или консорциум	Сахара	Коэффициенты	Значение	α для коэффициентов (по критерию Стьюдента)	α для модели (по критерию Фишера)	R^2
L. casei	фруктоза	a	1,6591	≤ 0,00001	≤ 0,00010	0,9834
		b	0,4807	≤ 0,00115		
	глюкоза	a	1,1490	≤ 0,00037	≤ 0,00231	0,9226
		b	0,3875	≤ 0,01948		
L. brevis	фруктоза	a	1,5815	≤ 0,00000	≤ 0,00001	0,9958
		b	0,4523	≤ 0,00007		
	глюкоза	a	1,0069	≤ 0,00163	≤ 0,05820	0,9434
		b	0,2013	≤ 0,07363		
L. plantarum	фруктоза	a	1,6516	≤ 0,00005	≤ 0,00034	0,9702
		b	0,3402	≤ 0,00315		
	глюкоза	a	1,1966	≤ 0,00050	≤ 0,00204	0,8732
		b	0,0832	≤ 0,04878		
L. brevis + *L. casei*	фруктоза	a	1,6205	≤ 0,00002	≤ 0,00012	0,9823
		b	0,3396	≤ 0,00114		
	глюкоза	a	0,8503	≤ 0,00003	≤ 0,00008	0,9968
		b	0,5949	≤ 0,00058		
L. brevis + *L. plantarum*	фруктоза	a	1,6608	≤ 0,00002	≤ 0,00012	0,9824
		b	0,3436	≤ 0,00115		
	глюкоза	a	0,8803	≤ 0,00013	≤ 0,00034	0,9915
		b	0,4329	≤ 0,00182		
L. casei+ *L. plantarum*	фруктоза	a	1,6636	≤ 0,00001	≤ 0,00004	0,9892
		b	0,3210	≤ 0,00047		
	глюкоза	a	0,8648	≤ 0,00356	≤ 0,01382	0,9001
		b	0,4596	≤ 0,08915		

микроорганизмов, входящих в консорциум. Однако абсолютные величины массовых долей углеводов в тот или иной момент процесса являются интегральными (результирующими) показателями, формируемыми предшествующим моменту ферментативным процессом. В этой связи наиболее адекватным показателем, позволяющим в дальнейшем определять тип взаимного влияния микроорганизмов в консорциуме, является динамика скорости сбраживания, отражающая «снимок» процесса в любой дискретный момент времени.

В соответствии с физическим смыслом искомого показателя, математическое описание скорости сбраживания представляют собой производные от (1) и (2):

$$y'_{js} = a_{js} \cdot b_{js} \cdot \exp\left(-b_{js} \cdot x\right) \quad (3)$$

$$y'_{cs} = a_{cs} \cdot b_{cs} \cdot \exp\left(-b_{cs} \cdot x\right) \quad (4)$$

Для получения полной картины условий функционирования микроорганизмов в составе консорциума необходимо определить удельную скорость сбраживания углеводов, приходящуюся на одну элементарную единицу учёта концентрации микроорганизмов в среде (колониеобразующую единицу). Для этого на основе массива экспериментальных данных по кинетике нарастания целевой микрофлоры в процессе ферментирования для всех вариантов исследований (монокультур и их парных консорциумов) были получены математические описания:

$$y_{jk} = \exp\left(\frac{a_{jk} + c_{jk} \cdot x + e_{jk} \cdot x^2}{1 + b_{jk} \cdot x + d_{jk} \cdot x^2}\right) \quad (5)$$

$$y_{ck} = \exp\left(\frac{a_{ck} + c_{ck} \cdot x + e_{ck} \cdot x^2}{1 + b_{ck} \cdot x + d_{ck} \cdot x^2}\right) \quad (6)$$

где x – продолжительность ферментирования сутки; a_{jk}, b_{jk}, c_{jk}, d_{jk} – расчётные коэффициенты для j-ой культуры; a_{ck}, b_{ck}, c_{ck}, d_{ck} – расчётные коэффициенты для консорциума.

Таким образом, математическое описание удельной скорости сбраживания углеводов в процессе ферментирования имеет вид:

– для j-го микроорганизма

$$v_{jud} = \frac{y'_{js}}{y_{jk}} = \frac{a_{js} \cdot b_{js} \cdot \exp\left(-b_{js} \cdot x\right)}{\exp\left(\frac{a_{jk} + c_{jk} \cdot x + e_{1k} \cdot x^2}{1 + b_{jk} \cdot x + d_{jk} \cdot x^2}\right)} \quad (7)$$

– для «усреднённого» микроорганизма консорциума

$$v_{cud} = \frac{y'_{cs}}{y_{ck}} = \frac{a_{cs} \cdot b_{cs} \cdot \exp\left(-b_{cs} \cdot x\right)}{\exp\left(\dfrac{a_{ck} + c_{ck} \cdot x + e_{ck} \cdot x^2}{1 + b_{ck} \cdot x + d_{ck} \cdot x^2}\right)} \quad (8)$$

Имеют место три вида взаимодействия микроорганизмов в консорциумах: синергизм, аддитивное взаимодействие и антагонизм. При синергизме результат взаимодействия микроорганизмов в консорциуме превосходит таковой, если бы микроорганизмы в консорциуме никак не влияли друг на друга. При аддитивном взаимодействии результативность консорциума равна простой сумме результативностей входящих в него монокультур. При антагонизме, вследствие взаимного угнетения микроорганизмов видов, входящих в консорциум, результативность последнего всегда хуже таковой для аддитивного взаимодействия.

Таким образом, для определения типа взаимодействия микроорганизмов в консорциумах в динамике процесса ферментирования необходимо определить аддитивную удельную скорость сбраживания углеводов на основании ранее полученных зависимостей:

$$v_{adud} = \frac{\sum_{j=1}^{n} v_{jud} \cdot y_{jk}}{\sum_{j=1}^{n} y_{jk}} = \frac{\sum_{j=1}^{n} y'_{js}}{\sum_{j=1}^{n} y_{jk}} = \frac{\sum_{j=1}^{n} a_{js} \cdot b_{js} \cdot \exp\left(-b_{js} \cdot x\right)}{\sum_{j=1}^{n} \exp\left(\dfrac{a_{jk} + c_{jk} \cdot x + e_{jk} \cdot x^2}{1 + b_{jk} \cdot x + d_{jk} \cdot x^2}\right)} \quad (9)$$

На основании математического описания зависимостей (8) и (9) получаем возможность определения типа взаимодействия культур молочнокислых микроорганизмов в консорциумах. Искомый показатель – фактора взаимного влияния k – удобно представить в логарифмической форме:

$$k = \lg\left(\frac{v_{cud}}{v_{adud}}\right) \quad (10)$$

В этом случае положительные k значения будут соответствовать синергизму; отрицательные – антагонизму; близкие к нулю – аддитивному взаимодействию, т. е. соседству без взаимного влияния.

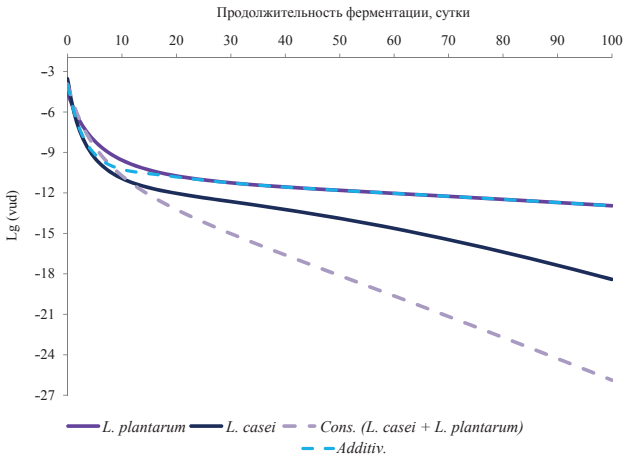
Рассмотрим динамики активности каждого из исследованных консорциумов.

Консорциум L. casei + L. plantarum. На рисунке 1 представлены зависимости удельной скорости сбраживания глюкозы и фруктозы от продолжительности ферментирования для монокультур *L. casei* и *L. plantarum*, их парного консорциума и случая аддитивного взаимодействия (additive). Для удобства восприятия данных удельная скорость сбраживания представлена в виде десятичного логарифма.

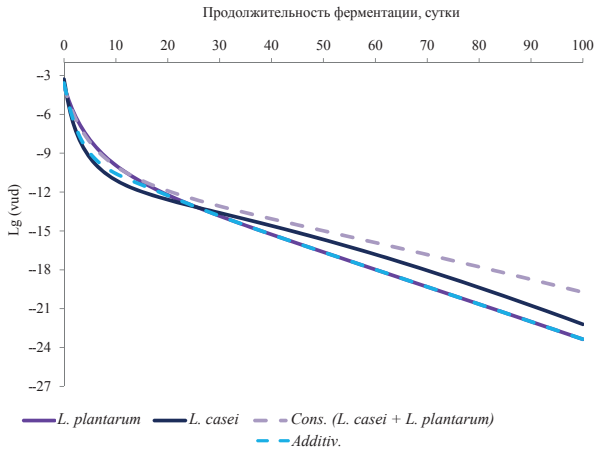
Анализ полученных зависимостей показал, что в процессе сбраживания глюкозы консорциумом *L. casei* + *L. plantarum* основную роль играет *L. plantarum*. *L. casei* выступает в качестве ингибитора процесса и не даёт первой культуре раскрыть свой потенциал. Активная фаза сбраживания глюкозы длится 30 суток, затем наступает плавное затухание процесса.

В случае с фруктозой можно сделать подобный вывод. Но после активной фазы сбраживания, длящейся до 10–12 суток, процесс постепенно замедляется. При этом скорость сбраживания фруктозы значительно превышает скорость сбраживания глюкозы.

В силу существенности различия в интенсивности сбраживания глюкозы и фруктозы в рамках одного



(a)



(b)

Рисунок 1. Влияние продолжительности ферментирования на скорость сбраживания глюкозы (a) и фруктозы (b) монокультурами *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus plantarum* и их консорциумом

Figure 1. Effect of fermentation time on the rate of glucose (a) and fructose (b) fermentation by monocultures of *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus plantarum*, and their consortium

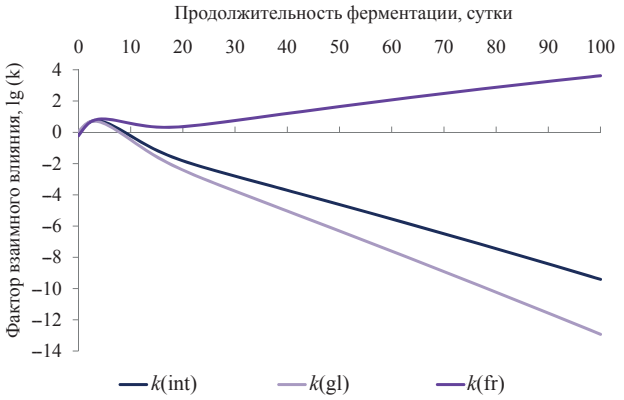


Рисунок 2. Динамика интегрального *k*(int) и частных *k*(gl) и *k*(fr) факторов взаимного влияния микроорганизмов в консорциуме *Lactobacillus casei* + *Lactobacillus plantarum* в процессе сбраживании глюкозы и фруктозы

Figure 2. Dynamics of integral *k*(int) and partial *k*(gl) and *k*(fr) factors of mutual influence of microorganisms in consortium *Lactobacillus casei* + *Lactobacillus plantarum* during glucose and fructose fermentation

и того же консорциума, наряду с оценкой частных факторов взаимного влияния микроорганизмов в консорциуме по сбраживанию глюкозы и фруктозы, целесообразно определить динамику и интегрального фактора взаимного влияния $k(\text{int})$, рассчитанного как аддитивный вариант, учитывающий вклад каждого из частных факторов:

$$k(\text{int}) = \frac{k(fr)\cdot f_{fr}(\tau) + k(gl)\cdot f_{gl}(\tau)}{f_{fr}(\tau) + f_{gl}(\tau)} \qquad (11)$$

где $k(fr)$ и $k(gl)$ – частные факторы взаимного влияния по сбраживанию фруктозы и глюкозы соответственно; $f_{fr}(\tau)$ и $f_{gl}(\tau)$ – математические описания динамики сбраживания фруктозы и глюкозы соответственно.

Зависимости интегрального и частных факторов взаимного влияния микроорганизмов в консорциуме *L. casei* + *L. plantarum* в процессе сбраживании глюкозы и фруктозы представлены на рисунке 2.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод об антагонистическом взаимодействии микроорганизмов в данном консорциуме по сбраживанию глюкозы, начиная с 8 суток. По фруктозе – синергическое взаимодействие с первых суток ферментирования в течение всего дальнейшего процесса. Несмотря на синергизм сбраживания фруктозы, динамика интегрального фактора взаимного влияния в течение всего процесса ферментирования показывает совокупное антагонистическое взаимодействие благодаря доминанте сбраживания глюкозы в общем процессе.

Факт устойчивого во времени синергического взаимодействия культур в консорциуме по одному из углеводов предполагает наличие потенциала смещения динамики интегрального фактора взаимного влияния в сторону синергизма, увеличивая долю углевода, обуславливающего синергизм сбраживания. В данном случае фруктозы.

Если создать условия, при которых, сохраняя динамику частных факторов взаимного влияния, создаются условия, когда $k(\text{int})$ в течение всего процесса ферментирования будет принимать значения, соответствующие синергизму взаимодействия (т. е., > 0), тогда справедливо:

$$\frac{k(fr)\cdot \omega^*_{fr} + k(gl)\cdot \omega^*_{gl}}{\omega^*_{fr} + \omega^*_{gl}} > 0 \qquad (12)$$

где ω^*_{fr} и ω^*_{gl} – начальные массовые доли фруктозы и глюкозы в субстрате, г/100 г.

В этом случае, решая неравенство, находим требуемое граничное условие:

$$z = \frac{\omega^*_{fr}}{\omega^*_{gl}} > -\frac{k(gl)}{k(fr)} \qquad (13)$$

где z – соотношение начальных массовых долей фруктозы и глюкозы в субстрате.

Тогда несложно рассчитать требуемое количество фруктозы $\omega_{fr(ad)}$, на которое необходимо скорректировать её начальную массовую долю в субстрате:

$$\omega_{fr(ad)} = z\cdot \omega_{gl} - \omega_{fr} \qquad (14)$$

где ω_{fr} и ω_{gl} – начальные массовые доли фруктозы и глюкозы в субстрате, г/100 г.

В случае, когда синергизм отмечен для глюкозы, а антагонизм для фруктозы, расчёты остаются справедливыми. Но необходимо поменять в них углеводы местами. В случае, когда по обоим углеводам отмечен устойчивый антагонизм, подобное определение проводить не имеет смысла.

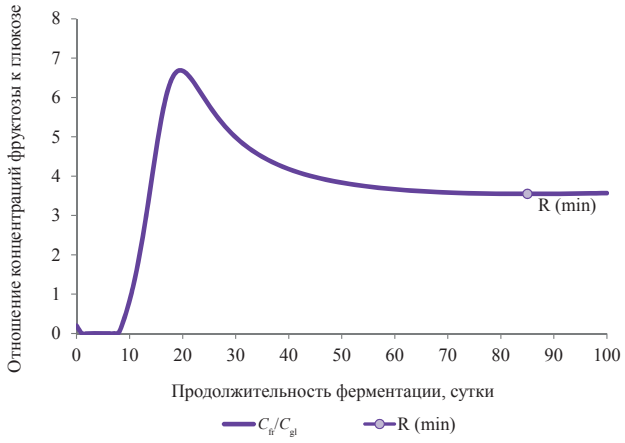


Рисунок 3. Динамика требуемого отношения концентраций фруктозы к глюкозе для смещения интегрального фактора взаимного влияния в консорциуме *Lactobacillus casei* + *Lactobacillus plantarum* в зону синергизма

Figure 3. Dynamics of the ratio of fructose vs. glucose required to shift the integral factor of mutual influence in consortium *Lactobacillus casei* + *Lactobacillus plantarum* into the synergistic zone

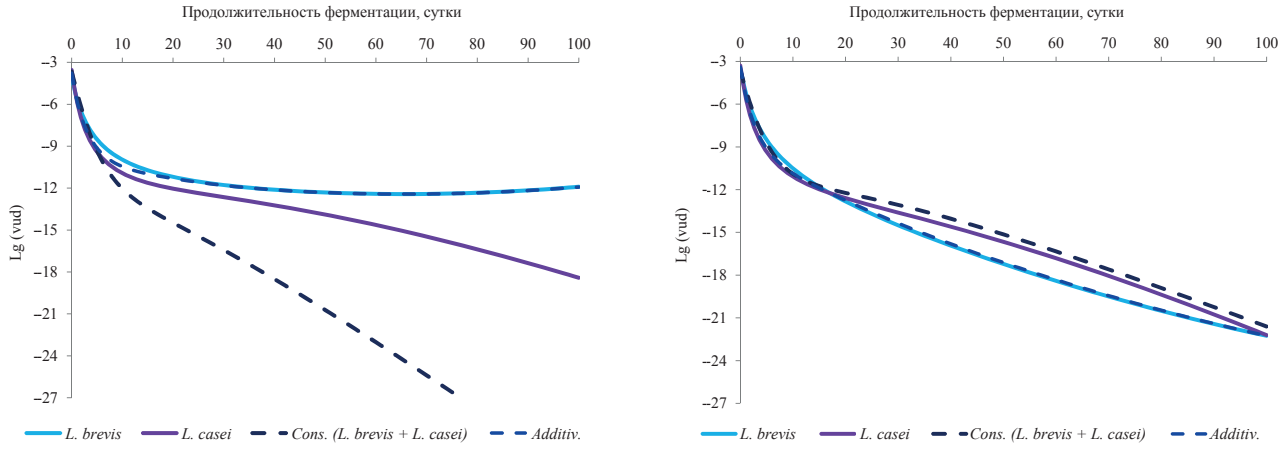


Рисунок 4. Влияние продолжительности ферментирования на скорость сбраживания глюкозы (a) и фруктозы (b) монокультурами *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus casei* и их консорциумом

Figure 4. Effect of fermentation time on the rate of glucose (a) and fructose (b) fermentation by monocultures of *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus casei*, and their consortium

Анализ динамики требуемой величины z в процессе ферментирования показал, что имеет место выраженная нелинейность (рис. 3).

В этом случае целесообразно определить её локальный минимум в интервале продолжительности ферментирования, соответствующем относительно устоявшемуся процессу R (min), и принять это значение за искомое ($z = R(\min)$). При этом соответствующее R (min) значение продолжительности ферментирования в силу принятого постулата физического смысла не имеет.

В результате комплексного анализа результатов экспериментальных данных и моделирования установлено, что для обеспечения интегрального синергизма микроорганизмов в консорциуме в процессе ферментирования необходимо, чтобы начальное соотношение фруктозы и глюкозы в субстрате было не менее 3,546. Это соответствует требуемому увеличению массовой доли фруктозы в субстрате на 5,98 г/100 г.

Консорциум L. brevis + L. casei. На рисунке 4 представлены зависимости удельной скорости сбраживания глюкозы и фруктозы от продолжительности ферментирования для монокультур *L. brevis* и *L. casei*, их парного консорциума и случая аддитивного взаимодействия.

Оценивая полученные данные по сбраживанию глюкозы, можно сделать вывод, что в процессе сбраживания основную роль играет *L. brevis*. При этом *L. casei* оказывает ингибирующее влияние на *L. brevis*. Активная фаза сбраживания глюкозы длится 50 суток. Затем идёт плавное затухание процесса.

В случае с фруктозой можем сделать аналогичный вывод. Однако после активной фазы сбраживания, длящейся до 10–12 суток, процесс замедляется. При этом скорость сбраживания фруктозы значительно превышает скорость сбраживания глюкозы.

По характеру отношения удельной скорости сбраживания углеводов данным консорциумом к удельной скорости сбраживания, рассчитанной из учёта аддитивного взаимодействия отдельных участников консорциума друг с другом, определим характер взаимодействия *L. brevis* и *L. casei* при их совместном культивировании.

Зависимости факторов взаимного влияния от продолжительности ферментирования представлены на рисунке 5.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод об антагонистическом взаимодействии микроорганизмов в консорциуме в отношении сбраживания глюкозы, начиная с 5 суток процесса.

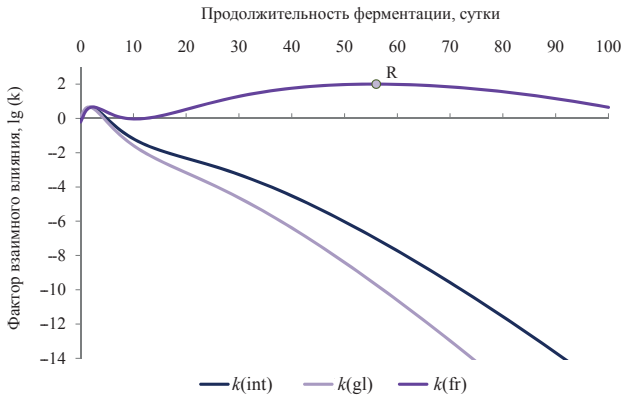


Рисунок 5. Динамика интегрального k(int) и частных k(gl) и k(fr) факторов взаимного влияния микроорганизмов в консорциуме *Lactobacillus brevis* + *Lactobacillus casei* в процессе сбраживании глюкозы и фруктозы

Figure 5. Dynamics of the integral k(int) and partial k(gl) and k(fr) factors of the mutual influence of microorganisms in consortium *Lactobacillus brevis* + *Lactobacillus casei* during glucose and fructose fermentation

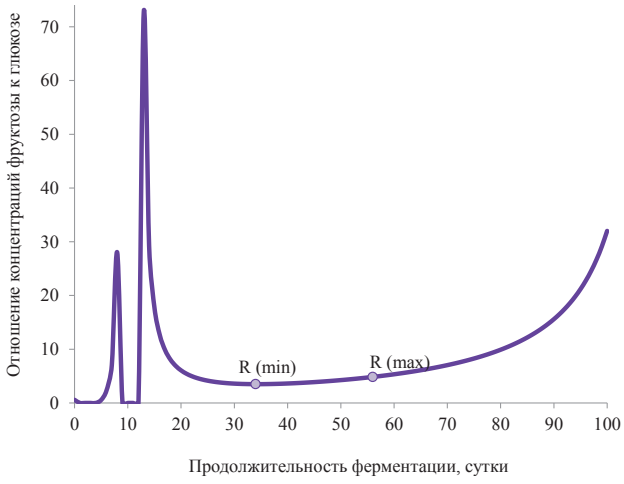


Рисунок 6. Динамика требуемого отношения концентраций фруктозы к глюкозе для смещения интегрального фактора взаимного влияния в консорциуме *Lactobacillus brevis* + *Lactobacillus casei* в зону синергизма

Figure 6. Dynamics of the ratio of fructose vs. glucose required to shift the integral factor of mutual influence in consortium *Lactobacillus brevis* + *Lactobacillus casei* into the synergistic zone

В отношении сбраживания фруктозы устойчивый синергизм имеет место, начиная с 13–14 суток. Так же как и в случае с консорциумом *L. casei* + *L. plantarum*, в течение всего процесса ферментирования имеет место совокупное антагонистическое взаимодействие монокультур в консорциуме. Это происходит благодаря доминанте сбраживания глюкозы в общем процессе.

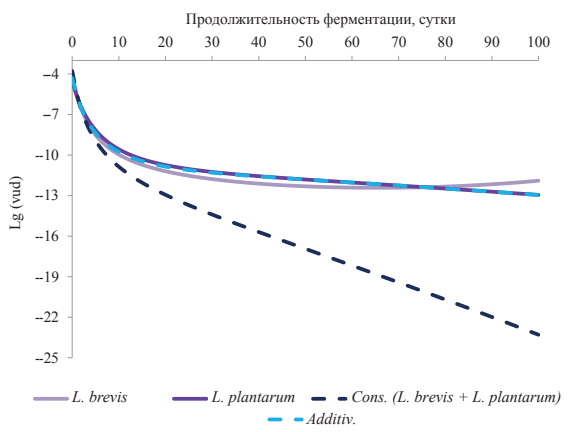
Анализ динамики требуемой величины *z* в процессе ферментирования показал выраженную её нелинейность (рис. 6). В этом случае в качестве области относительно устоявшегося процесса условно можно принять интервал периода ферментирования от 20 до 80 суток, когда кривая динамики имеет пологий вид. Тогда локальный минимум данного интервала – R (min) – соответствует значению 3,5. Для обеспечения устойчивого синергизма по интегральному фактору взаимного влияния начальная массовая доля фруктозы в субстрате должна быть минимум в 3,5 раза больше, чем начальная массовая доза глюкозы. При этом гарантированный синергизм будет возможен исключительно на том интервале продолжительности ферментирования, которому соответствует синергизм частного фактора взаимного влияния по сбраживанию фруктозы, т. е. с 13–14 суток от начала ферментирования.

Таким образом, для обеспечения интегрального синергизма микроорганизмов в консорциуме в процессе ферментирования необходимо увеличение массовой доли фруктозы в субстрате на 5,87 г/100 г.

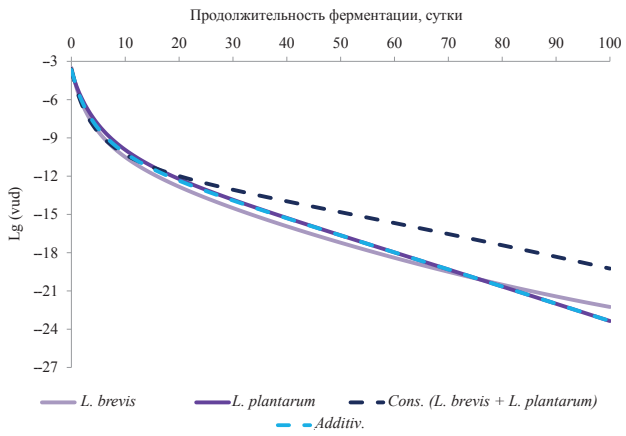
Консорциум L. brevis + L. plantarum. На рисунке 7 представлены зависимости удельной скорости сбраживания глюкозы и фруктозы от продолжительности ферментирования для монокультур *L. brevis* и *L. plantarum*, их парного консорциума и случая аддитивного взаимодействия.

Оценивая полученные данные по сбраживанию глюкозы, можно сделать вывод, что в процессе сбраживания основную роль играет *L. plantarum*. При этом *L. brevis* оказывает ингибирующее влияние на *L. plantarum* и не даёт *L. plantarum* раскрыть свой потенциал. Активная фаза сбраживания глюкозы длится 40–50 суток. Затем идёт плавное затухание процесса.

В случае с фруктозой можем сделать подобный вывод. Но после активной фазы сбраживания, длящейся до 10–12 суток, процесс постепенно замедляется. При этом скорость сбраживания



(a)



(b)

Рисунок 7. Влияние продолжительности ферментирования на скорость сбраживания глюкозы (a) и фруктозы (b) монокультурами *Lactobacillus brevis, Lactobacillus plantarum* и их консорциумом

Figure 7. Effect of fermentation time on the rate of glucose (a) and fructose (b) fermentation by monocultures of *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus plantarum*, and their consortium

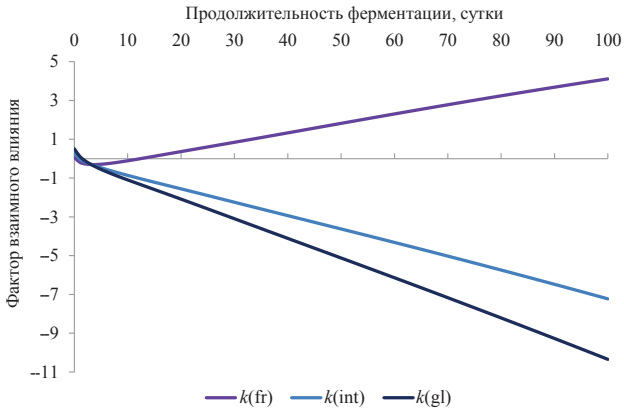


Рисунок 8. Динамика интегрального *k*(int) и частных *k*(gl) и *k*(fr) факторов взаимного влияния микроорганизмов в консорциуме *Lactobacillus brevis* + *Lactobacillus plantarum* в процессе сбраживании глюкозы и фруктозы

Figur 8. Dynamics of integral *k*(int) and partial *k*(gl) and *k*(fr) factors of the mutual influence of microorganisms in consortium *Lactobacillus brevis* + *Lactobacillus plantarum* during glucose and fructose fermentation

глюкозы значительно превышает скорость сбраживания фруктозы.

По характеру отношения удельной скорости сбраживания углеводов консорциумов к удельной скорости сбраживания, рассчитанной из учёта аддитивного взаимодействия отдельных участников консорциума друг с другом, определим характер взаимодействия *L. brevis* и *L. plantarum* при совместном культивировании.

Зависимости факторов взаимного влияния от продолжительности ферментирования представлены на рисунке 8.

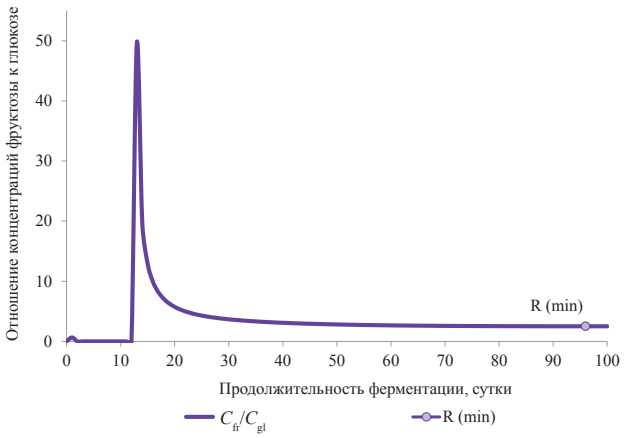


Рисунок 9. Динамика требуемого отношения концентраций фруктозы к глюкозе для смещения интегрального фактора взаимного влияния в консорциуме *Lactobacillus brevis* + *Lactobacillus plantarum* в зону синергизма

Figure 9. Dynamics of the ratio of fructose vs. glucose required to shift the integral factor of mutual influence in consortium *Lactobacillus brevis* + *Lactobacillus plantarum* into the synergistic zone

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод об антагонистическом взаимодействии в отношении сбраживания глюкозы, начиная со 2 суток, а по фруктозе – о выраженном синергизме с 13 суток ферментирования. При этом в течение всего процесса ферментирования имеет место совокупное антагонистическое взаимодействие монокультур. Это происходит благодаря доминанте сбраживания глюкозы в общем процессе.

Анализ динамики требуемой величины *z* в процессе ферментирования показал её нелинейность (рис. 9). Начиная с 20 суток ферментирования, исследуемая динамика переходит в очень пологую область относительно устоявшегося процесса с локальным минимумом R (min), соответствующим значению 2,515. Для обеспечения устойчивого синергизма по интегральному фактору взаимного влияния начальная массовая доля фруктозы в субстрате должна быть в 2,515 раза больше, чем начальная массовая доза глюкозы. При этом гарантированный синергизм будет возможен исключительно на интервале продолжительности ферментирования, которому соответствует синергизм частного фактора взаимного влияния по сбраживанию фруктозы, т. е. с 13 суток от начала ферментирования.

Для обеспечения интегрального синергизма микроорганизмов в консорциуме в процессе ферментирования необходимо увеличение массовой доли фруктозы в субстрате на 3,65 г/100 г.

Таким образом, следствием совокупного анализа результатов проведённых исследований является наиболее оптимальным для проведения процесса микробной трансформации субстрата на основе белокочанной капусты сорта «Слава» консорциум молочнокислых микроорганизмов *L. brevis* + *L. plantarum*. Для активации его синергического потенциала необходимо скорректировать углеводный состав субстрата добавлением фруктозы в количестве 3,65 г/100 г.

Представленный подход к определению необходимой степени изменения углеводного состава субстрата для обеспечения синергизма молочнокислых микроорганизмов в парных консорциумах в процессе ферментирования растительного сырья позволяет получать однозначные заключения о приемлемости того или иного исследуемого консорциума и необходимой степени коррекции углеводного состава.

Выводы

По результатам исследований получены экспериментальные данные по интенсивности сбраживания глюкозы и фруктозы в процессе ферментирования монокультурами молочнокислых микроорганизмов и их парными консорциумами. Впервые исследования поставлены на модельных средах.

Был разработан аналитический подход к определению необходимой степени изменения углеводного состава субстрата для обеспечения синергизма молочнокислых микроорганизмов в парных консорциумах в процессе ферментирования растительного сырья. Данный подход может быть использован при совершенствовании существующих и создании новых промышленных технологий производства ферментированной продукции из растительного сырья.

В процессе исследований были выявлены неоднозначности: наличие фруктозы приводит к синергическому типу взаимодействия молочнокислых микроорганизмов в парных консорциумах, а глюкозы – к антагонистическому. Поэтому необходимо создать условия для смещения интегрального вида взаимодействия в сторону синергизма. Для этого имеет смысл дополнительно вносить фруктозу в процессе ферментирования.

В случае консорциума *L. casei* + *L. plantarum* в процессе ферментирования основную роль играет *L. plantarum*, а *L. casei* является ингибитором процесса. В случае консорциума *L. brevis* + *L. casei* основную роль играет *L. brevis*, тогда как *L. casei* выступает в качестве ингибитора процесса ферментирования. В случае консорциума *L. brevis* + *L. plantarum* основную роль играет *L. plantarum*, а *L. brevis* ингибирует процесс ферментирования.

Для любого из трёх исследованных парных консорциумов, в сочетании с дополнительно вносимой фруктозой, можно достичь синергизма. Этот факт имеет большое значение, т. к. не ограничивает производителя в выборе штаммов молочнокислых микроорганизмов для консорциумов, равно как и сортов белокочанной капусты по содержанию глюкозы и фруктозы. Тем не менее, для квашения белокочанной капусты сорта «Слава» наиболее целесообразно использовать консорциум *L. brevis* + *L. plantarum* с добавлением к субстрату фруктозы в количестве не менее 3,65 г/100 г.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в подготовке и написании статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

All the authors contributed equally to the study and bear equal responsibility for information published in this article.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Рекомендации по рациональным нормам потребления пищевых продуктов, отвечающих современным требованиям здорового питания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71385784/. – Дата обращения: 02.10.2020.

2. Guizani, N. Fermentation / N. Guizani, A. Mothershaw // Handbook of food science, technology and engineering. Volume 2 / Y. H. Hui, J. D. Culbertson. – Boca Raton : CRC Press, 2006. – P. 63.

3. Синха, Н. К. Настольная книга производителя и переработчика плодоовощной продукции / Н. К. Синха. – СПб. : Профессия, 2014. – 896 с.

4. Белокурова, Е. С. Биотехнология продуктов растительного происхождения / Е. С. Белокурова, О. Б. Иванченко. – СПб. : Лань, 2019. – 232 с.

5. Saravacos, G. Design of food processes and food processing plants / G. Saravacos, A. E. Kostaropoulos // Handbook of food processing equipment / G. Saravacos, A. E. Kostaropoulos. – Cham : Springer, 2016. – P. 1–50. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25020-5_1.

6. Научно-обоснованные подходы к процессу ферментации овощей и преимущества использования бактериальных заквасочных культур / Н. Е. Посокина, О. Ю. Лялина, А. И. Захарова [и др.] // Овощи России. – 2018. – Т. 43, № 5. – С. 77–80. https://doi.org/10.18619/2072-9146-2018-5-77-80.

7. Caplice, E. Food fermentations: role of microorganisms in food production and preservation / E. Caplice, G. F. Fitzgerald // International Journal of Food Microbiology. – 1999. – Vol. 50, № 1–2. – P. 131–149. https://doi.org/10.1016/s0168-1605(99)00082-3.

8. Bhalla, T. C. Yeasts and traditional fermented foods and beverages / T. C. Bhalla, Savitri // Yeast diversity in human welfare / T. Satyanarayana, G. Kunze. – Singapore : Springer, 2017. – P. 53–82. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2621-8_3.

9. Paramithiotis, S. Lactic acid fermentation of fruits and vegetables / S. Paramithiotis. – Boca Raton : CRC Press, 2017. – 312 p. https://doi.org/10.1201/9781315370378.

10. Guizani, N. Chapter 9. Fermentation as a method for food preservation / N. Guizani, A. Mothershaw // Handbook of food preservation / M. S. Rahman. – Boca Raton : CRC Press, 2007. https://doi.org/10.1201/9781420017373.

11. Detection of bacteriocins produced by *Lactobacillus plantarum* strains isolated from different foods / A. Atrih, N. Rekhif, M. Michel [et al.] // Microbios. – 1993. – Vol. 75, № 303. – P. 117–123.

12. Harris, L. J. Characterization of two nisin-producing *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* strains isolated from a commercial sauerkraut fermentation / L. J. Harris, H. P. Fleming, T. R. Klaenhammer // Applied and Environmental Microbiology. – 1992. – Vol. 58, № 5. – P. 1477–1483. https://doi.org/10.1128/aem.58.5.1477-1483.1992.

13. Hutkins, R. W. Microbiology and technology of fermented foods / R. W. Hutkins. – Wiley-Blackwell, 2006. – 473 p.

14. McFeeters, R. F. Fermentation microorganisms and flavor changes in fermented foods / R. F. McFeeters // Journal of Food Science. – 2004. – Vol. 69, № 1. – P. FMS35–FMS37.

15. Salminen, S. Lactic acid bacteria: microbiological and functional aspects. 3rd edition / S. Salminen, A. von Wright, A. Ouwehand. – Boca Raton : CRC Press, 2004. – 656 p. https://doi.org/10.1201/9780824752033.

16. The continuing story of class IIa bacteriocins / D. Drider, G. Fimland, Y. Hechard [et al.] // Microbiology and Molecular Biology Reviews. – 2006. – Vol. 70, № 2. – P. 564–582. https://doi.org/10.1128/MMBR.00016-05.

17. Leroy, F. Lactic acid bacteria as functional starter cultures for the food fermentation industry / F. Leroy, L. De Vuyst // Trends in Food Science and Technology. – 2004. – Vol. 15, № 2. – P. 67–78. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.09.004.

18. Gokulan, K. Metabolic pathways. Production of secondary metabolites of bacteria / K. Gokulan, S. Khare, C. Cerniglia // Encyclopedia of food microbiology. Second Edition / C. A. Batt, M. L. Tortorello. – Academic Press, 2014. – P. 561–569. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00203-2.

References

1. Rekomendatsii po ratsional′nym normam potrebleniya pishchevykh produktov, otvechayushchikh sovremennym trebovaniyam zdorovogo pitaniya [Recommended rational norms of food consumption that meet modern requirements for a healthy diet] [Internet]. [cited 2020 Oct 02]. Available from: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71385784/.

2. Guizani N, Mothershaw A. Fermentation. In: Hui YH, Culbertson JD, editors. Handbook of food science, technology and engineering. Volume 2. Boca Raton: CRC Press; 2006. pp. 63.

3. Sinkha NK. Nastol′naya kniga proizvoditelya i pererabotchika plodoovoshchnoy produktsii [Handbook of the producer and processor of fruit and vegetable products]. St. Petersburg: Professiya; 2014. 896 p. (In Russ.).

4. Belokurova ES, Ivanchenko OB. Biotekhnologiya produktov rastitel′nogo proiskhozhdeniya [Biotechnology of plant products]. St. Petersburg: Lan′; 2019. 232 p. (In Russ.).

5. Saravacos G, Kostaropoulos AE. Design of food processes and food processing plants. In: Saravacos G, Kostaropoulos AE, editors. Handbook of food processing equipment. Cham: Springer; 2016. pp. 1–50. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25020-5_1.

6. Posokina NE, Lyalina OYu, Zakharova AI, Shishlova ES, Tereshonok VI. Scientifically-based approaches to the process vegetable fermentation and advantages use of bacterial starter cultures. Vegetable Crops of Russia. 2018;43(5):77–80. (In Russ.). https://doi.org/10.18619/2072-9146-2018-5-77-80.

7. Caplice E, Fitzgerald GF. Food fermentations: Role of microorganisms in food production and preservation. International Journal of Food Microbiology. 1999;50(1–2):131–149. https://doi.org/10.1016/s0168-1605(99)00082-3.

8. Bhalla TC, Savitri. Yeasts and traditional fermented foods and beverages. In: Satyanarayana T, Kunze G, editors. Yeast diversity in human welfare. Singapore: Springer; 2017. pp. 53–82. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2621-8_3.

9. Paramithiotis S. Lactic acid fermentation of fruits and vegetables. Boca Raton: CRC Press; 2017. 312 p. https://doi.org/10.1201/9781315370378.

10. Guizani N, Mothershaw A. Chapter 9. Fermentation as a method for food preservation. In: Rahman MS, editor. Handbook of food preservation. Boca Raton: CRC Press; 2007. https://doi.org/10.1201/9781420017373.

11. Atrih A, Rekhif N, Michel M, Lefebvre G. Detection of bacteriocins produced by *Lactobacillus plantarum* strains isolated from different foods. Microbios. 1993;75(303):117–123.

12. Harris LJ, Fleming HP, Klaenhammer TR. Characterization of two nisin-producing *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* strains isolated from a commercial sauerkraut fermentation. Applied and Environmental Microbiology. 1992;58(5):1477–1483. https://doi.org/10.1128/aem.58.5.1477-1483.1992.

13. Hutkins RW. Microbiology and technology of fermented foods. Wiley-Blackwell; 2006. 473 p.

14. McFeeters RF. Fermentation microorganisms and flavor changes in fermented foods. Journal of Food Science. 2004;69(1):FMS35–FMS37.

15. Salminen S, von Wright A, Ouwehand A. Lactic acid bacteria: microbiological and functional aspects. 3rd edition. Boca Raton: CRC Press; 2004. 656 p. https://doi.org/10.1201/9780824752033.

16. Drider D, Fimland G, Hechard Y, McMullen LM, Prévost H. The continuing story of class IIa bacteriocins. Microbiology and Molecular Biology Reviews. 2006;70(2):564–582. https://doi.org/10.1128/MMBR.00016-05.

17. Leroy F, De Vuyst L. Lactic acid bacteria as functional starter cultures for the food fermentation industry. Trends in Food Science and Technology. 2004;15(2):67–78. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.09.004.

18. Gokulan K, Khare S, Cerniglia C. Metabolic pathways. Production of secondary metabolites of bacteria. In: Batt CA, Tortorello ML, editors. Encyclopedia of food microbiology. Second Edition. Academic Press; 2014. pp. 561–569. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00203-2.

Сведения об авторах

Кондратенко Владимир Владимирович
канд. техн. наук, доцент, заместитель директора по научной работе, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования, 142703, Россия, г. Видное, ул. Школьная, 78, e-mail: nauka@vniitek.ru
https://orcid.org/0000-0002-0913-5644

Посокина Наталья Евгеньевна
канд. техн. наук, заведующая лабораторией технологии консервирования, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования, 142703, Россия, г. Видное, ул. Школьная, 78, e-mail: Labtech45@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-7857-6785

Лялина Ольга Юрьевна
канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории технологии консервирования, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования, 142703, Россия, г. Видное, ул. Школьная, 78, e-mail: olgalyalina@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-6401-3319

Колоколова Анастасия Юрьевна
канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории качества и безопасности пищевой продукции, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования, 142703, Россия, г. Видное, ул. Школьная, 78, e-mail: aykolokolova@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-9816-1720

Глазков Сергей Владимирович
ведущий научный сотрудник лаборатории качества и безопасности пищевой продукции, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования, 142703, Россия, г. Видное, ул. Школьная, 78, e-mail: s.glazkov@outlook.com
https://orcid.org/0000-0002-3457-6118

Information about the authors

Vladimir V. Kondratenko
Cand.Sci.(Eng.), Associated Professor, Deputy Director for Science, Russian Research Institute of Canning Technology, 78, Shkol'naya Str., Vidnoe, 142703, Russia, e-mail: nauka@vniitek.ru
https://orcid.org/0000-0002-0913-5644

Natalia E. Posokina
Cand.Sci.(Eng.), Head of the Laboratory of Food Canning Technology, Russian Research Institute of Canning Technology, 78, Shkol'naya Str., Vidnoe, 142703, Russia, e-mail: Labtech45@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-7857-6785

Ol'ga Yu. Lyalina
Cand.Sci.(Eng.), Leading Researcher of the Laboratory of Food Canning Technology, Russian Research Institute of Canning Technology, 78, Shkol'naya Str., Vidnoe, 142703, Russia, e-mail: olgalyalina@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-6401-3319

Anastasiay Yu. Kolokolova
Cand.Sci.(Eng.), Leading Researcher of the Laboratory of Quality and Safety of Food Products, Russian Research Institute of Canning Technology, 78, Shkol'naya Str., Vidnoe, 142703, Russia, e-mail: aykolokolova@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-9816-1720

Sergey V. Glazkov
Leading Researcher of the Laboratory of Quality and Safety of Food Products, Russian Research Institute of Canning Technology, 78, Shkol'naya Str., Vidnoe, 142703, Russia, e-mail: s.glazkov@outlook.com
https://orcid.org/0000-0002-3457-6118